第46卷 第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 5
May 2023

塔里木盆地北缘一次局地极端暴雪天气异常机制及成因

曲良璐[1,2], 姚俊强[2], 赵 勇[1], 周雪雁[3]

(1. 成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆阿克苏地区气象局,新疆 阿克苏 843300)

摘 要: 2021年4月2日塔里木盆地北缘拜城县出现突破历史同期极值的灾害性暴雪。利用ERA5高分辨率再分析资料、自动气象站观测资料和FY-2G卫星资料,分析了极端暴雪天气环流异常、多尺度环流特征及物理机制。结果表明:(1) 高层伊朗高压及低纬东风气流的异常导致中亚低涡与高原低涡异常结合,加强了低层异常东风气流,东风急流引导南海、孟加拉湾暖湿空气沿河西走廊到达塔里木盆地中部,使得水汽辐合及垂直上升运动加强,在地面辐合线触发下,产生极端降雪天气。地面冷高压稳定维持,导致塔里木盆地持续降温,而拜城位于海拔1000 m以上的浅山区,二者共同作用,造成拜城4月降水相态仍然为雪。(2) 垂直位温梯度和西风异常导致湿斜压不稳定发展,形成低层锋生和高层及近地面湿位涡异常,而锋生作用和湿位涡异常又通过垂直运动变化影响降雪的发生发展。对于拜城而言,起决定作用的是中层的上升运动及300~500 hPa的垂直风切变。(3) 中尺度云团不断发展并向东北移动经过拜城县上空,增加了降雪持续时间和降雪强度,移动方向和传播方向的一致性则决定了中尺度云团生消演变特征。研究结果可加深对塔里木盆地局地极端暴雪成因的认知,为精确预报、精准服务提供科学支撑。

关 键 词: 极端暴雪; 大气环流异常; 斜压锋生; 中尺度云团; 塔里木盆地

文章编号: 1000-6060(2023)05-0719-11(0719~0729)

暴雪作为冬季主要的灾害性天气之一,常对交通、城市运行、人民生命财产、工农业生产带来严重影响[1-2]。受纬度、地形以及海陆分布的影响,我国平均降雪强度和大-暴雪日数最多的区域位于东北、青藏高原以及新疆北部地区[3]。为了深入理解暴雪天气,许多专家学者针对区域暴雪的天气学成因及水汽来源方面开展了大量工作[4-5],对造成暴雪的中尺度系统及其发生发展机理进行了诸多研究[6-8],也对暴雪过程中物理机制(如锋生作用及次级环流[9-10]、湿位涡[11-13]等)进行诊断分析,研究明确了锋生强迫、条件对称不稳定、中尺度重力波和高低空急流等在暴雪形成中的重要作用。随着全球气候变化,新疆出现暖湿化气候特征,同时暴雨、雪等极端天气发生频次也明显增加[14-16]。针对新疆暴雪的触发、维持、加强和消亡机制和各尺度天气系统间的相互作用等方面的研究指出:锋面、高低空急流、辐合线、切变线和中α尺度云团是暴雪的主要影响系统[17-19]。

塔里木盆地地处新疆南部,由于其三面环山,地势梯度大,又包含沙漠、平原、山地等多种地形分布,造成其生态系统和气候特征较为复杂。塔里木盆地年降水量仅为40~70 mm,且主要集中在夏季,是典型的干旱气候[20-22]。塔里木盆地多年平均暴雪日数接近于0 d[3],这表明暴雪天气的发生是小概率事件,但暴雪这种小概率事件的发生给人民的生命、生活造成很大的损失[20]。已有针对塔里木盆地暴雪天气的个例研究表明,在中亚低涡、低层偏东急流、副热带西风急流、中尺度云团的作用下,锋生

收稿日期: 2022-08-23; **修订日期:** 2022-10-21

基金项目: 新疆自然科学基金重点项目(2022D01D86);国家自然科学基金项目(42171038,41875102)资助

作者简介: 曲良璐(1991-),女,硕士研究生,主要从事干旱区极端天气气候变化研究. E-mail: aksqll@sina.com

通讯作者: 姚俊强(1987-),男,博士,研究员,主要从事干旱区气候变化与水分循环研究. E-mail: yaojq1987@126.com

作用产生条件性对称不稳定形成倾斜对流导致强降雪发生[23-25]，以上研究多针对个例进行短期天气过程演变分析，中长期环流异常的分析较少。2021年4月拜城出现突破历史同期极值暴雪，仅单日降雪量便达到年降雪量，造成拜城县直接经济损失达5235.28×10⁴元。针对此次天气本文发现以下几点问题：(1) 南疆地区3月月平均气温便升至5~10 ℃[26]，其降雪多发生时间在12月中下旬—3月上旬，为何此次暴雪天气过程发生在4月？(2) 南疆暴雪多发生在塔里木盆地西部，为何此次天气发生在中部，且日降雪量突破历史同期极值？为了对以上问题进行解释，本文将通过暴雪天气异常机制及多尺度系统相互作用等方面，探讨暴雪极端性的成因，以提高塔里木盆地极端暴雪天气的预报能力，为防灾、减灾、救灾提供科学支撑。

1 资料与方法

1.1 天气实况

2021年3月29日—4月4日，塔里木盆地出现降水、降温天气，天气过程伴随局地暴雨(雪)、冰雹、大风等灾害性天气，最大降水中心位于拜城县铁热克镇，累积降雪量达88.9 mm(其中73.7 mm为雪，15.2 mm为雨)。4月2日拜城县出现罕见强降雪天气，县域内共有17站出现暴雪(日降雪量>12.0 mm)，超过拜城县区域一半以上站次(图1a)，各地新增积雪30~50 cm。拜城站日降雪量41.0 mm(大暴雪)，居历史同期第一位，强降雪天气造成拜城县直接经济损失达5235.28×10⁴元。通过拜城站气象要素的变化可以看出，降雪从2日02:00持续至2日14:00，时间长达13 h；降雪时段集中且小时雪强大，雪强最大达5.6 mm·h^{-1}(图1b)。

1.2 气象资料

本文所取气象资料时间范围为2021年3月20日—4月2日，所用资料包括：(1) 拜城县地面气象自动站逐小时观测资料；(2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代气象再分析数据ERA5逐小时高空、地面再分析资料，垂直方向37个气压层，水平分辨率0.25°×0.25°[27]；(3) 国家卫星中心提供的逐小时FY-2G相当黑体亮度温度(TBB)数据。

降雪量级使用新疆本地标准，即：24 h降雪量6.1~12.0 mm为大雪；12.1~24.0 mm为暴雪；>24.0 mm为大暴雪。

1.3 研究方法

本文利用湿位涡和锋生函数等物理量对暴雪成因进行诊断分析。

(1) 湿位涡：在p坐标中，引入静力近似，并假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多，湿位涡的表达式为：

$$\mathrm{MPV} = -g\left(\xi_p + f\right)\frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g\frac{\partial \theta}{\partial p}\frac{\partial \theta_e}{\partial y} \quad (1)$$

式中：MPV为位势涡度(PVU=10^{-6} m^2·K·s^{-1}·kg^{-1})；g为重力加速度(9.8 m·s^{-1})；f为科式参数或地转涡度(s^{-1})；ξ_p为p坐标系中的垂直涡度分量(s^{-1})；θ_e为相当位温(K)；v为水平风(m·s^{-1})；x、y、p为三维坐标轴；θ为位温(K)。湿位涡概念的引进将大气中对流不稳定和湿斜压对称不稳定联系在一起，湿斜压性对称不稳定系统可以通过湿位涡的斜压部分清楚地反应出来[28]。

(2) 锋生函数：表征水平运动、垂直运动、非绝

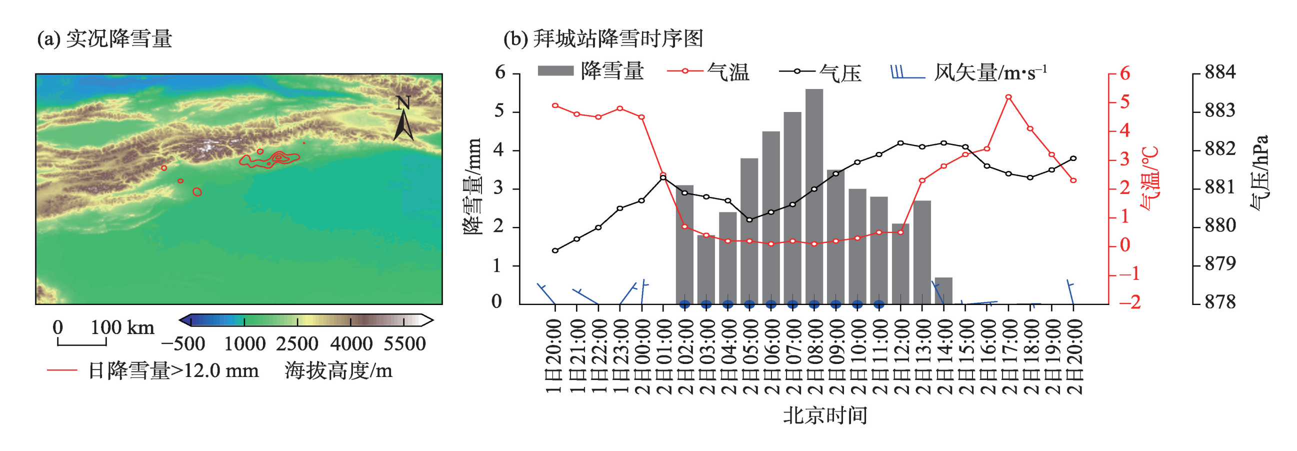


图1 4月2日拜城县降雪量及地形分布

Fig. 1 Distribution of geographical and snowfall in Baicheng County on 2 April

热变化和摩擦诸因素对锋生作用的物理量[29]。锋生函数的表达式为：

$$F=\frac{1}{2}|\nabla\theta|[D\cos(2\beta)-\delta] \qquad (2)$$

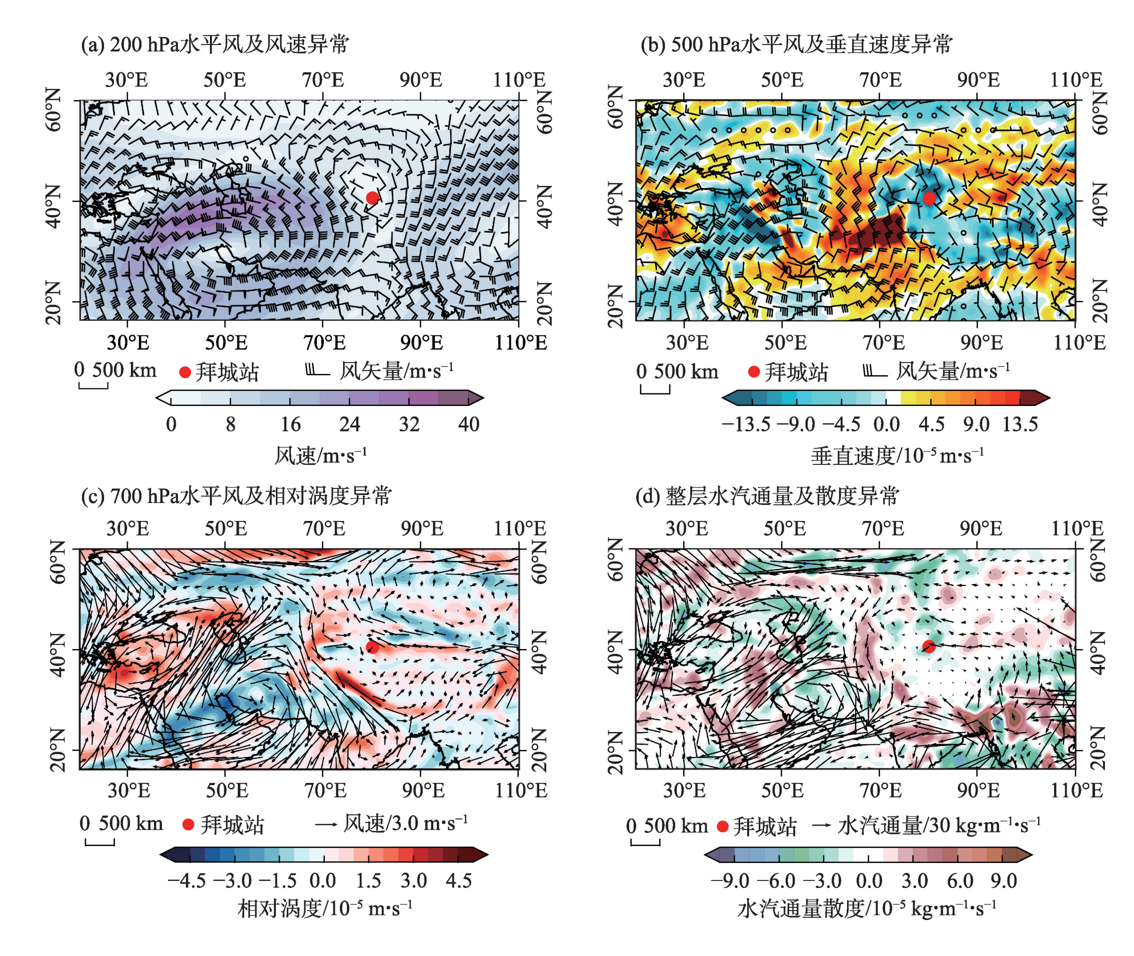
式中：F为2维锋生函数（K·m^{-1}·s^{-1}），$F>0$表示锋生，$F<0$表示锋消；θ为位温（K）；D为总形变项；β为膨胀轴（x轴）和位温梯度的夹角（°）；δ为辐散项。

2　结果与分析

2.1　行星尺度环流异常特征

从前文的分析可知，此次天气发生时间、降雪落区及降雪量级对于塔里木盆地整个冷季来说都具有异常性和极端性，那么降雪发生前的环流系统是否出现异常，又是如何影响此次极端性降雪过程的呢？

从2021年3月20日—4月2日环流合成场异常可以看出：200 hPa（图2a）环流异常主要表现为伊朗高压及中亚气旋异常，由此造成中纬度40°N副热带西风急流显著加强与南移、低纬20°N东风气流加强。500 hPa（图2b）里咸海至伊朗高原为异常反气旋，我国西部地区为异常气旋控制，气旋环流的2个中心分别位于青藏高原及新疆北部，塔里木盆地中东部地区异常上升运动达0.1 m·s^{-1}。从700 hPa风场异常来看（图2c），蒙古地区异常反气旋系统底部异常东风沿河西走廊深入塔里木盆地中部，沿东风气流正涡度异常发展。水汽输送异常（图2d）表现为南海及孟加拉湾的水汽沿异常南风和东风气流向北向西输送至新疆，并造成塔里木盆地中部异常水汽辐合。高层行星尺度环流异常提供了中低层环流异常背景；中层异常反气旋系统加强了北方冷空气补充，低纬暖湿空气随气旋东风向西输送，冷暖空气剧烈交汇增强了水汽及垂直上升运动；低层偏东气流的异常引导异常水汽沿东风向塔里木盆地中东部输送。高中低层大气环流异常相互耦合，



注：环流异常为2021年与1979—2020年差值，合成时段为3月20日—4月2日。

图2　暴雪前期大气环流异常

Fig. 2　Anomalies of atmospheric circulation before snowstorm

是此次天气的环流异常机制。

2.2 天气尺度环流演变特征

上节本文分析了暴雪天气发生前环流异常特征，那么暴雪发生过程各种尺度环流是如何演变和相互作用的？

从不同层次环流形势演变来看：200 hPa南亚高压呈带状分布，2个反气旋中心分别位于阿拉伯半岛和中南半岛，呈现东强西弱的模态；新疆南部至印度半岛为槽区。中纬度副热带西风急流位于30°N，2个中心分别位于伊朗高原和内蒙古，中心风速超过60 m·s^{-1}（图略）。500 hPa（图3a~b）：降雪发生前，中纬度呈两脊一槽环流型，里咸海至伊朗高原及中南半岛至东北为高压脊区；槽区内有2个气旋环流，分别位于中亚及青藏高原南部，中亚低涡中心强度为540 dagpm，伴有−36 ℃的冷中心。4月2日08:00，里咸海高压脊衰退，冷空气沿脊前偏北气流输送至中亚低涡，低涡增强；青藏高原南部低涡减弱成横切变线并北抬，低涡西南风与切变线东风将暖湿空气输送至塔里木盆地，盆地内湿度增大，降雪发展。对于低层而言，雪强最强时，700 hPa（图3c）中亚低涡配合−12 ℃冷空气进入塔里木盆地，蒙古地区反气旋底部偏东风进入盆地后加强至8 m·s^{-1}，在盆地西部形成辐合，比湿达3 g·kg^{-1}。850 hPa（图3d）：偏北风携带冷空气东移至盆地中部，与加强至16 m·s^{-1}的偏东风形成辐合，湿度增加，上升运动加强，配合西高东低的地形，东风西伸过程中先沿地形爬升，又在盆地中西部形成风速辐合，进一步增强了上升运动。

从4月1日08:00—2日14:00地面冷高压中心逐6 h变化情况来看（图4），初始时刻冷高压中心位

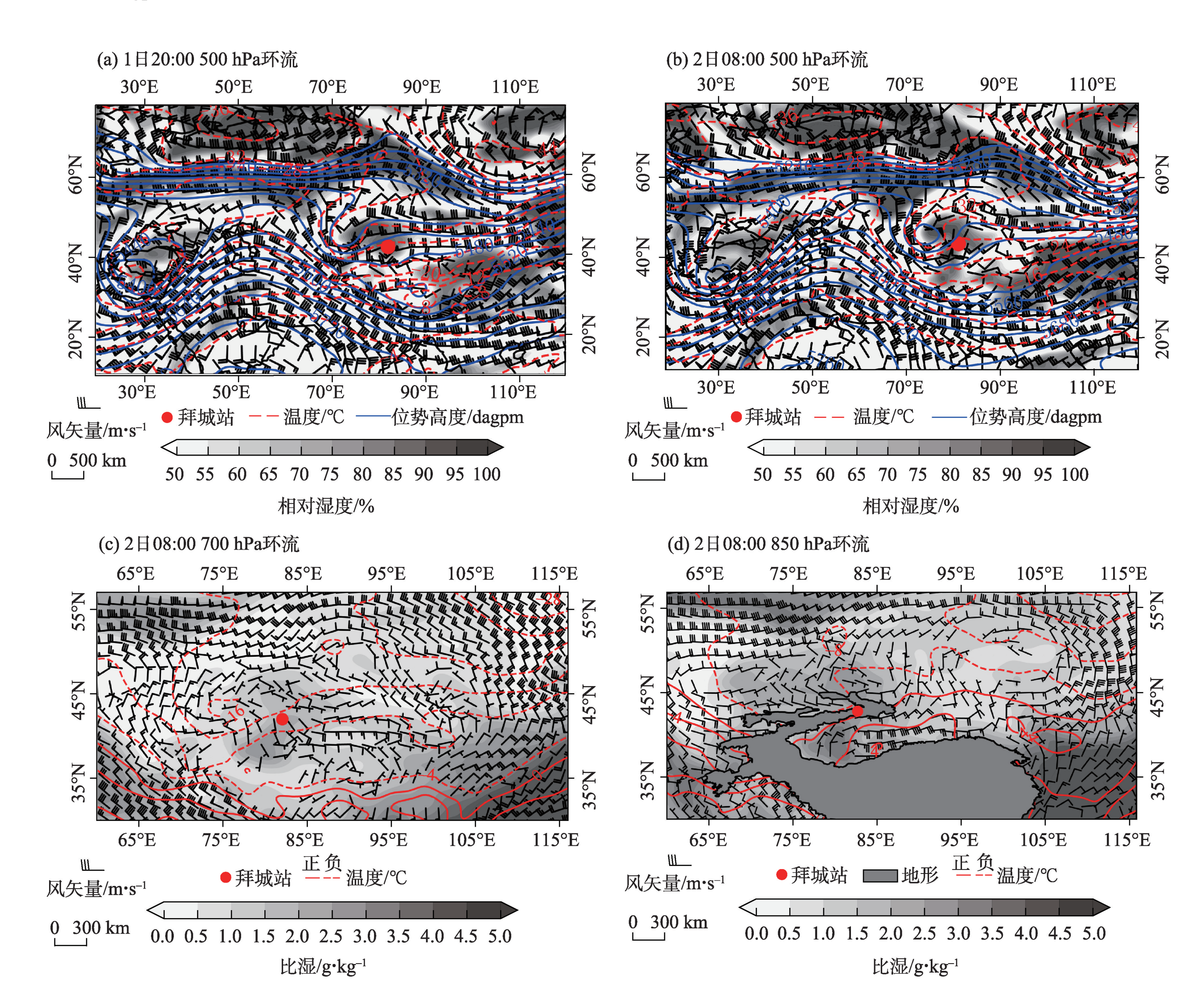
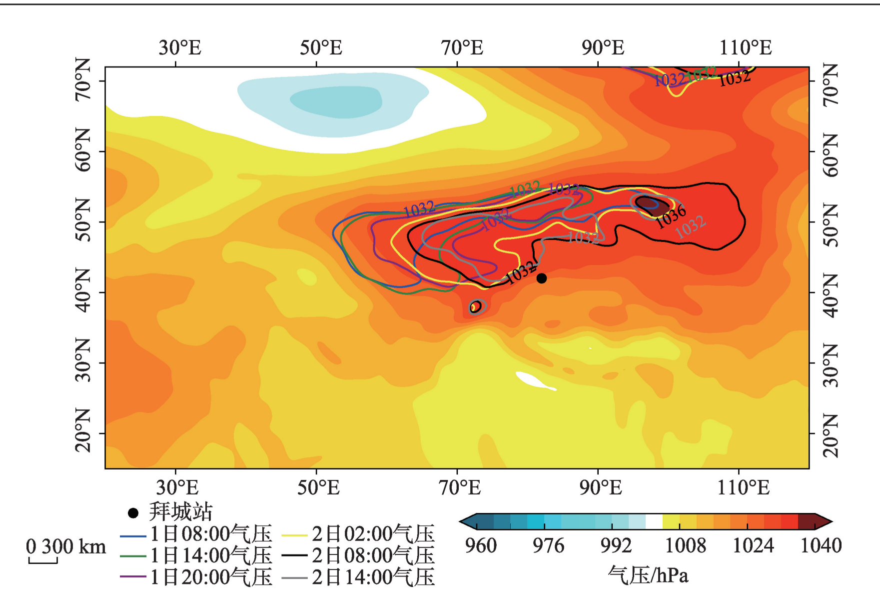


图3 暴雪过程大气环流演变

Fig. 3 Evolution of the atmospheric circulation of snowstorm



注：线条表示海平面气压超过1032 hPa，填色区域为2日08:00海平面气压场。

图4 4月1日08:00—2日14:00海平面气压中心演变

Fig. 4 Evolution of sea level mean pressure center from 08:00 on 1 April to 14:00 on 2 April

于里咸海-西伯利亚，中心强度超过1032 hPa，东西范围超过40个经度；随后的24 h之内，冷高压中心主体缓慢东移。拜城雪强最大的时刻，冷高压在蒙古地区分裂出一个强度达1036 hPa的中心。一部分冷空气通过西天山海拔较低处进入盆地；另一部分冷空气随东风沿昆仑山北侧进入盆地腹地，东西风辐合于盆地西缘，冷高压的长期稳定维持可增加降雪的持续时间，从而影响总降雪量。

水汽输送和辐合对于降水天气的产生有着至关重要的作用，从整层水汽通量及水汽通量散度来看(图5)：降雪发生前，中亚低涡西风水汽输送位于塔里木盆地南部，拜城水汽主要来源于北疆地区反气旋较弱的东风输送。4月2日08:00，北疆地区东风输送减弱，低纬水汽沿青藏高原东侧向北输送，在高原北侧加强后继续向西输送，塔里木盆地水汽通量明显增加，最大东风输送超过50 kg·m^{-1}·s^{-1}。而此时中亚低涡减弱东移北上，西风水汽输送也相应北移至塔里木盆地中、北部，东西风水汽辐合于塔里木盆地中部，最强辐合达30×10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}，此时也是拜城雪强最大时刻。

2.3 中小尺度物理机制及成因

在有利的天气尺度环流背景下，中小尺度系统能够决定降雪的落区和强度，水汽及热动力物理量可以更精确地刻画降雪的时空差异。因此，本文利用水汽通量、锋生函数、湿位涡等物理量，更加全面地理解此次极端暴雪天气。

2.3.1 水汽条件 拜城站的气压平均值为880 hPa，因此本文截取875 hPa以上的部分。从拜城站时间高度剖面图(图6)中：整个时段内上升运动与湿区位于500~700 hPa，最强上升运动与最大水汽输送对应，均出现在降雪趋于结束时。从风场演变来看，低层东风、中层南风以及高层西南风符合南疆降水“三支气流”模型。对应降水起止时间：降雪开始时，700 hPa东风加强向高层传播，300 hPa西风加速，500 hPa西风减速，300~500 hPa的垂直风切变增大约为16 m·s^{-1}；降水增强时，300 hPa西风持续加速，300~500 hPa的垂直风切变在08:00达到最大约为26 m·s^{-1}；随着高层西风减速，中高层垂直风切变减弱，降水强度逐渐减弱并停止。由上可知：中层的上升运动及300~500 hPa的垂直风切变是此次拜城降雪天气发生发展的主要因素。

2.3.2 热动力成因 上文得知，此次降雪天气上升运动主要出现在中层，那么这种现象是否与斜压锋生作用有关呢？图7为相当位温，锋生函数以及风场剖面图。降雪开始时刻(图8a)，拜城区域等相当位温线随高度向北倾斜，地面至500 hPa垂直相当位温梯度为6 K，锋生强度为1×10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}；纬向风垂直分布为低层东风、高层西风，沿锋生区域出现上升运动。随着冷空气主体翻越天山进入盆地(图7b)，沿山脉锋生强度增大至5×10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}，垂

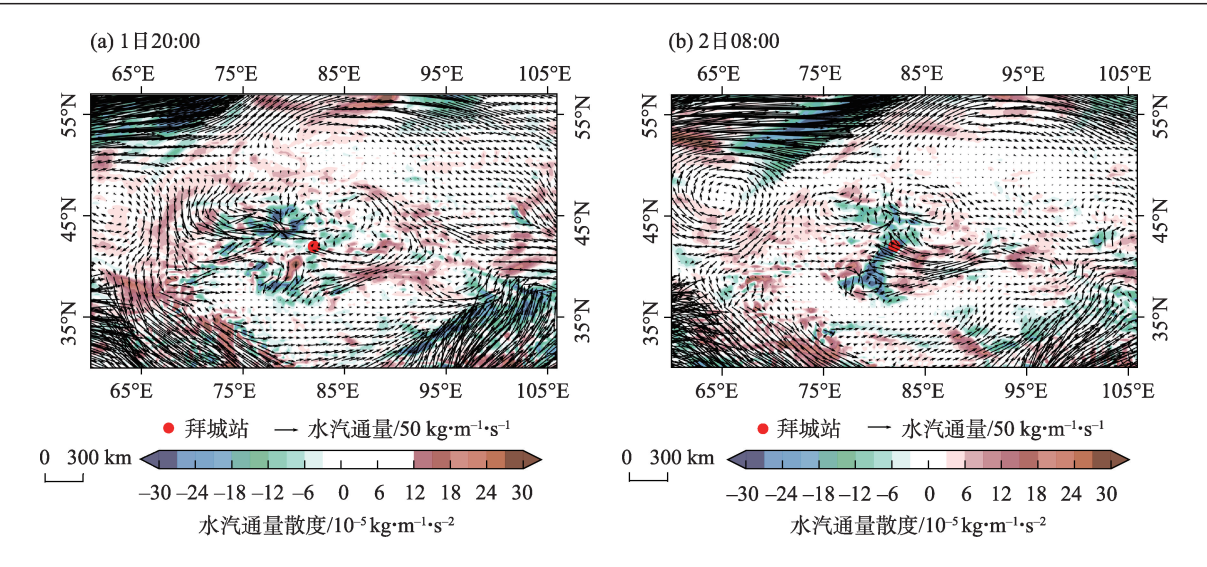


图5 地面至300 hPa整层水汽通量与整层水汽通量散度

Fig. 5 Integrated water vapor flux and water vapor flux divergence from ground to 300 hPa

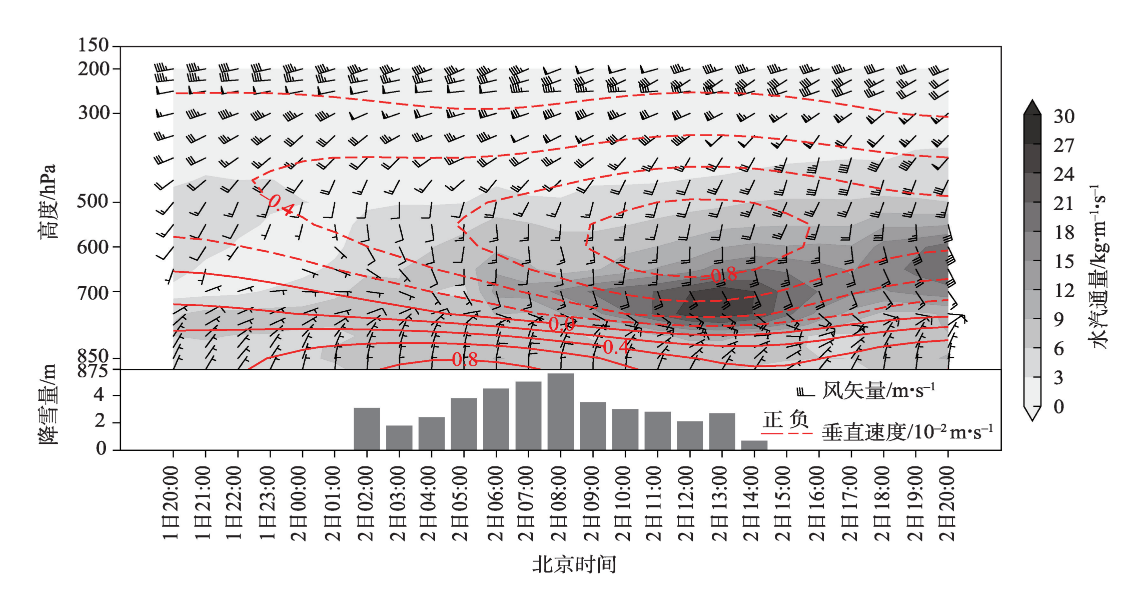


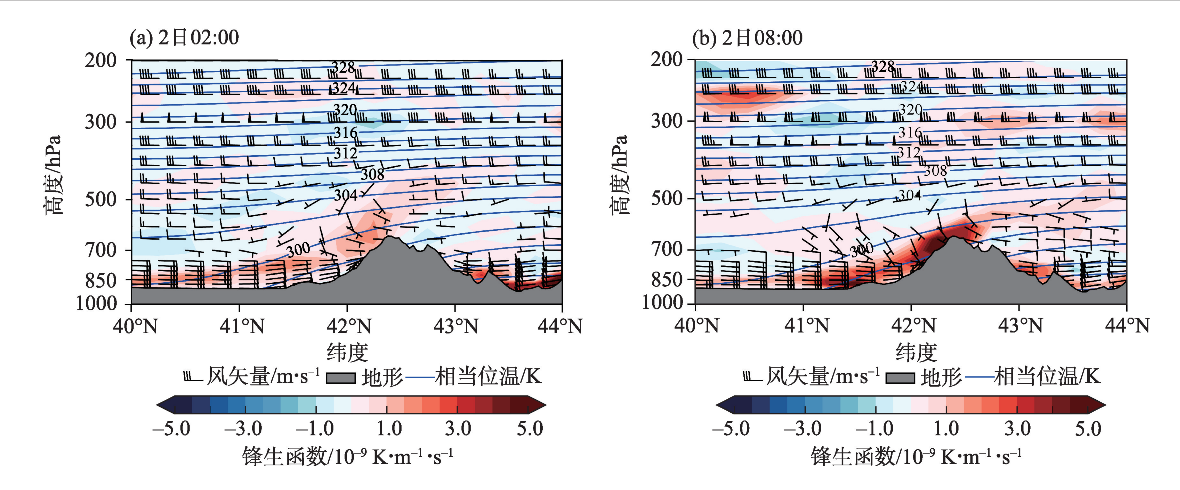
图6 4月1日08:00—2日14:00拜城站时间高度剖面及逐小时降雪量变化

Fig. 6 Time-height profile and snowfall changes at Baicheng station from 08:00 on 1 April to 14:00 on 2 April

直运动也相应增强,降雪增强。根据以上分析可知:降雪的发生发展受近地面锋生产生的垂直运动影响,而锋生则与冷空气强度、厚度密切相关。

湿位涡异常与湿斜压不稳定性密切相关,图8a中湿位涡正异常分布在300 hPa和近地面;经向风垂直分布为低层北风、高层南风,经向风与地形相互作用,在拜城近地面形成垂直环流,垂直上升区域分散在中高层南风风速辐合区。降雪最强时(图8b),拜城高层湿位涡增大,近地面湿位涡达3 PVU,伴随低层南、北风加速,垂直环流向南、低层拓展,中低层上升速度增至2 m·s⁻¹。从以上分析可知,300 hPa及近地面湿位涡异常,尤其是后者对降雪发生发展有重要作用,高、低层湿位涡异常分别由垂直位温梯度和西风异常的影响及湿斜压不稳定发展引起。

2.3.3 触发机制 地面中小尺度辐合线可作为强天气的触发机制,从图9可以看出:4月1日20:00,塔里木盆地西部为温度露点差小于4 ℃的湿区,南北温度梯度达16 ℃,北-东风辐合线位于40°N。4月2日02:00,东风加强向西向北推进,辐合线及0 ℃进入拜城,拜城降雪开始;2日08:00,拜城东部暖平流加强,拜城西部出现弱气旋环流,热、动力条件相互



注：矢量风场为水平风(U, m·s^{-1})及垂直速度(ω, 10^{-2} m·s^{-1})合成。下同。

图7 锋生函数、相当位温及矢量风场沿82°E剖面

Fig. 7 Latitude-height profile of front-generated function, equivalent potential temperature and synthetic winds along 82°E

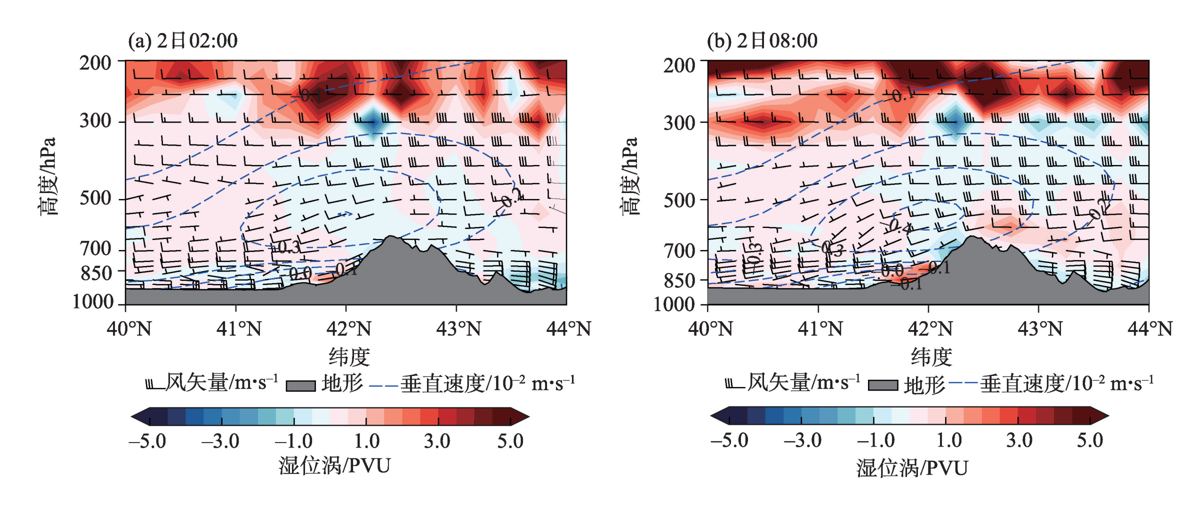


图8 湿位涡、垂直速度及矢量风场沿82°E剖面

Fig. 8 Latitude-height profile of moist potential vorticity, vertical velocity and synthetic winds along 82°E

配合，降雪最强；2日14:00，北风东伸，东风东退，拜城只受偏北风冷平流影响，降水结束。辐合线维持，冷暖空气长时间对峙，均有利于持续性强降雪的产生。

2.3.4 卫星特征 卫星对于追踪天气系统的演变具有时空分辨率高的优势，图10为4月2日拜城降雪期间的卫星云图。2日04:00，新疆偏西地区有3个呈西南东北走向的中β尺度云团，云顶亮温低于223 K，拜城位于东北方云团西南边缘；2日06:00，中β尺度云团开始合并，云团不断向东北方向传播和移动并经过拜城上空；2日08:00，中β尺度云团完全合并，此时刻的云团强度和范围均达到最大，并表现出锋面云系的特征，但移动方向变为西—东；2日12:00，由于云团传播方向和移动方向不同，云团减弱消散，降雪趋于结束。综合分析，223 K中尺度云团不断发展并向东北移动经过拜城，造成了拜城持续强降雪天气。

3 讨 论

根据前文分析，本文试图对以下问题进行回答：(1) 为何此次天气发生在塔里木盆地中部拜城县，且日降雪量突破历史同期极值?(2) 为何此次暴雪天气过程发生在4月?

首先，此次天气除了具有南疆盆地大暴雪的典型环流形势，即高层南亚高压、副热带大槽、副热带西风气流；中层中亚低涡、低层偏东急流及辐合线；地面冷高压、辐合线[17,20,22]。也表现出了明显差异：

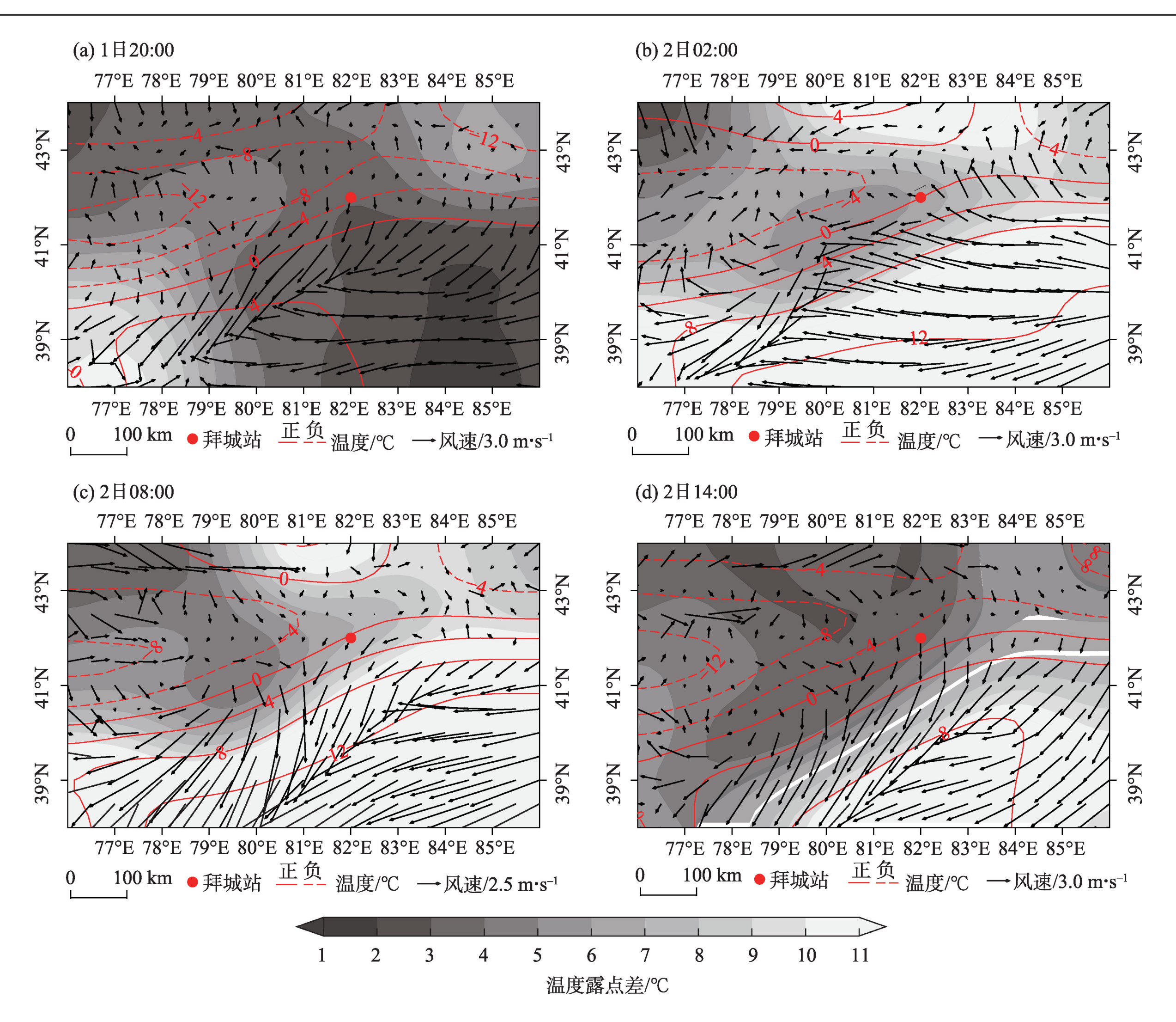


图9 地面气象要素演变

Fig. 9 Evolution of meteorological elements on the surface

高层伊朗高压及低纬东风气流的异常导致中亚低涡与高原低涡异常结合，造成此次天气水汽主要来源于沿青藏高原东南侧的东南风输送，使得水汽只能输送至塔里木盆地中部地区。其次，地面强冷高压的长时间维持，冷空气不断向塔里木盆地内渗透，降雪前持续降温，加之拜城地处浅山区，造成拜城在4月仍产生强降雪天气。

4 结 论

本文利用多元气象资料，塔里木盆地北缘一次局地极端暴雪天气环流异常、多尺度环流特征及物理机制进行分析，得出以下结论：

（1）降雪发生前，高层伊朗高压及低纬东风气流的异常导致中亚低涡与高原低涡异常结合，低层东风加强，东风水汽输送加强并到达塔里木盆地中部地区；环流异常导致前期持续降温配合拜城地形，造成拜城4月的降雪天气。

（2）降雪过程中，高层南亚高压、副热带大槽、副热带西风气流；中层中亚-青藏高原低涡、低层偏东急流及辐合线；地面冷高压、辐合线相互作用，引导南海、孟加拉湾暖湿空气沿河西走廊到达塔里木盆地中部，造成水汽辐合及垂直上升运动加强，增加了降雪强度。

（3）垂直位温梯度和西风异常导致湿斜压不稳定发展，形成锋生和高层、近地面湿位涡异常，并通过垂直运动变化影响降雪的发生发展。对于拜城而言，起决定作用的是中层的上升运动及300~500 hPa的垂直风切变，随着冷暖平流的剧烈交绥，低层锋生导致斜压不稳定发展，地面辐合线触发产生强降雪天气。

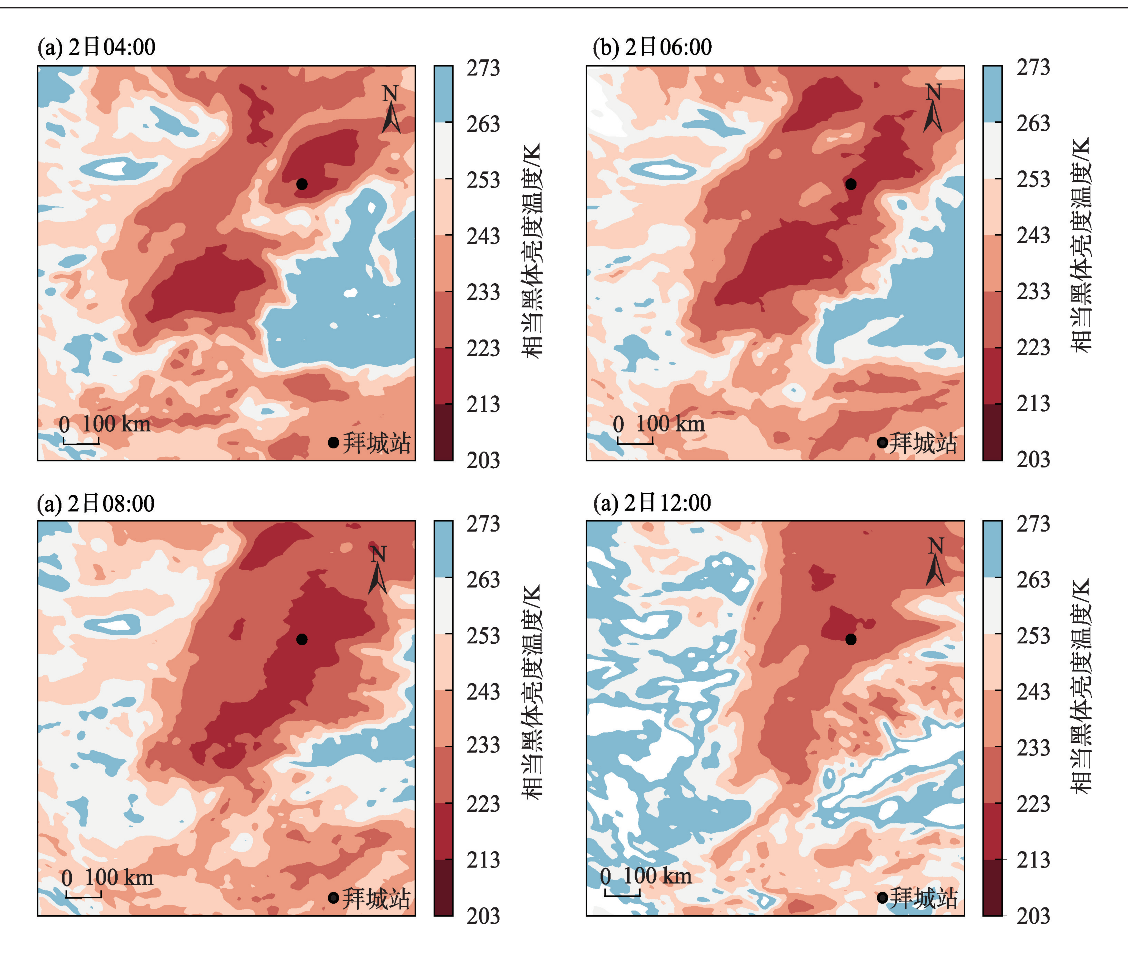


图10 4月2日相当黑体亮度温度演变

Fig. 10 Evolution of the equivalent blackbody brightness temperature during 2 April

（4）中尺度云团不断发展东北移经过拜城，增加了降雪持续时间和降雪强度，移动方向和传播方向的一致性则决定了中尺度云团生消演变特征。

参考文献(References)

[1] 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅰ：气候特征与影响评估[J]. 气象, 2008, 34(4): 95–100. [Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disaster in south China during January 2008 Ⅰ: Climate features and its impact[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(4): 95–100.]

[2] 郝璐, 王静爱, 满苏尔, 等. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 42–48. [Hao Lu, Wang Jing'ai, Mansuer, et al. Spatial-temporal change of snow disaster and analysis of vulnerability of animal husbandry in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 42–48.]

[3] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏. 中国降雪气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1176–1185. [Liu Yulian, Ren Guoyu, Yu Hongmin. Climatology of snow in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(10): 1176–1185.]

[4] 杨莲梅, 刘雯. 新疆北部持续性暴雪过程成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 507–519. [Yang Lianmei, Liu Wen. Cause analysis of persistent heavy snow processes in the northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 507–519.]

[5] 高松影, 赵婷婷, 宋丽丽, 等. 辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 439–446. [Gao Songying, Zhao Tingting, Song Lili, et al. Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 439–446.]

[6] 冯丽莎, 宋攀, 郑飞, 等. 2016年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J]. 大气科学, 2020, 44(1): 13–26. [Feng Lisha, Song Pan, Zheng Fei, et al. Diagnostic analysis of a severe regional snowstorm event in the early winter of 2016 in Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(1): 13–26.]

[7] 张俊兰, 施俊杰, 李伟, 等. 乌鲁木齐暴雪天气的环流配置及中尺度系统特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 1–8. [Zhang Junlan, Shi Junjie, Li Wei, et al. Atmospheric circulation and meso-scale system characteristics of snowstorm in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(1): 1–8.]

[8] 范俊红, 易笑园. 大范围持续暴雪过程中多种影响系统的对比分析[J]. 气象学报, 2019, 77(6): 965–979. [Fan Junhong, Yi Xiaoyuan. Comparative analysis of several influencing systems in the process of a large-scale continuous snowstorm[J]. Acta Meteo-

rologica Sinica, 2019, 77(6): 965−979.]

[9] 李兆慧, 王东海, 王建捷, 等. 一次暴雪过程的锋生函数和急流—锋面次级环流分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1505−1515. [Li Zhaohui, Wang Donghai, Wang Jianjie, et al. Analysis on frontogenesis function and jet-front secondary circulation in a snowstorm process[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(6): 1505−1515.]

[10] 李娜, 李如琦, 秦贺, 等. 2018年10月乌鲁木齐暴雪过程锋面分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 36−43. [Li Na, Li Ruqi, Qin He, et al. Frontal characteristics of the snowstorm process in Urumqi in October 2018[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(5): 36−43.]

[11] 姜有山, 束宇, 李力, 等. 基于湿位涡和积雪效率的降雪预报技术探讨[J]. 气象科学, 2017, 37(5): 659−665. [Jiang Youshan, Shu Yu, Li Li, et al. Investigation on snowfall forecasting skills based on moist potential vorticity and efficiency of snow accumulation[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(5): 659−665.]

[12] 李如琦, 唐冶, 路光辉, 等. 北疆暴雪过程的湿位涡诊断[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(5): 1−6. [Li Ruqi, Tang Ye, Lu Guanghui, et al. Diagnosis of moist potential vorticity of a snowstorm process in northern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(5): 1−6.]

[13] 黄晓璐, 林弘杰, 李一平, 等. 2020年初内蒙古一次暴雪天气过程的成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(6): 18−25. [Huang Xiaolu, Lin Hongjie, Li Yiping, et al. Causes of the snowstorm event in the early winter of 2020 in Inner Mongolia[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(6): 18−25.]

[14] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333−346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Tuoliewubieke Dilinuer, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961—2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333−346.]

[15] 李双双, 张杰, 陈志恒. 中亚地区冬季极端降雪增加与北大西洋两类海温模态增强的联系[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1124−1140. [Li Shuangshuang, Zhang Jie, Chen Zhiheng. The relationship between the increase of extreme snowfall in winter of Central Asia and the enhancement of two SST modes in the North Atlantic [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1124−1140.]

[16] 杨霞, 周鸿奎, 许婷婷, 等. 南疆夏季不同类型暴雨精细化特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 747−756. [Yang Xia, Zhou Hongkui, Xu Tingting. Comparative analysis of the fine characteristics of different rainstorms in southern Xinjiang during summer[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 747−756.]

[17] 施俊杰, 孙鸣婧, 吕新生, 等. 南疆西部春季一次极端暴雪天气综合分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 131−140. [Shi Junjie, Sun Mingjing, Lü Xinsheng, et al. Comprehensively analysis of an extreme snowstorm in the west of southern Xinjiang in spring[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 131−140.]

[18] 杨涛, 杨莲梅, 周鸿奎, 等. 新疆北部小时降雪特征及大暴雪天气影响系统研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 725−733. [Yang Tao, Yang Lianmei, Zhou Hongkui, et al. Hourly snowfall characteristics and influence system of heavy snowstorm in northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 725−733.]

[19] 杨霞, 李阿桥, 赵逸舟, 等. 1961—2018年新疆北部冬季暴雪时空分布及其环流特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 756−765. [Yang Xia, Li Aqiao, Zhao Yizhou, et al. Spatial-temporal distribution and general circulation of snowstorm in northern Xinjiang from 1961 to 2018[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 756−765.]

[20] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987. [Zhang Jiabao, Deng Zifeng. Introduction of precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987.]

[21] 毛炜峄, 南庆红, 史红政. 新疆气候变化特征及气候分区方法研究[J]. 气象, 2008, 34(10): 67−73. [Mao Weiyi, Nan Qinghong, Shi Hongzheng. Research of climatic regionalization with climate change in Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(10): 67−73.]

[22] 杨霞, 张云惠, 赵逸舟, 等. 南疆西部一次罕见大暴雪过程分析[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1414−1423. [Yang Xia, Zhang Yunhui, Zhao Yizhou, et al. Analysis on rare snowstorm in west of southern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(5): 1414−1423.]

[23] 于碧馨, 洪月, 张云惠, 等. 天山两麓一次极端暴雪天气多尺度配置及机制分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 11−18. [Yu Bixin, Hong Yue, Zhang Yunhui, et al. Multiscale configuration characteristics and mechanism of an extreme snowstorm over the stride of Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(5): 11−18.]

[24] 张云惠, 于碧馨, 谭艳梅, 等. 2011年两次中亚低涡影响南疆西部降雪机制分析[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1307−1316. [Zhang Yunhui, Yu Bixin, Tan Yanmei, et al. Influence mechanism analysis of snow caused by two Central Asian vortexes in west southern Xinjiang in 2011[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(5): 1307−1316.]

[25] 陈春艳, 秦贺, 唐冶, 等. 2012年3月新疆大范围暴雨雪天气诊断分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(2): 12−18. [Chen Chunyan, Qin He, Tang Ye, et al. Diagnosis analystic of wide-range rainstorm and snowstorm occurred in Xinjiang in March 2012[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(2): 12−18.]

[26] 郑红莲, 严军, 元慧慧. 南疆地区近58年气温、降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 103−109. [Zheng Honglian, Yan Jun, Yuan Huihui. Analysis of temperature and precipitation of southern Xinjiang in last 58 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 103−109.]

[27] Hans H, Bill B, Paul B, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999−2049.

[28] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995(4): 387−405. [Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. Wet potential vortex and tilt vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995(4): 387−405.]

[29] 段旭, 段玮, 张亚男, 等. 利用锋生函数对2008年年初昆明准静止锋生消过程的诊断分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 325–338. [Duan Xu, Duan Wei, Zhang Ya'nan, et al. Diagnostic analysis of frontogenesis and frontolysis of Kunming quasi-stationary front in early 2008 based on frontogenesis function[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(2): 325–338.]

Mechanism and causes of a local extreme snowstorm at the northern edge of the Tarim Basin

QU Lianglu[1,2], YAO Junqiang[2], ZHAO Yong[1], ZHOU Xueyan[3]

(1. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China;
2. Institution of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Aksu Meteorological Bureau, Aksu 843300, Xinjiang, China)

Abstract: On April 2, 2021, a catastrophic snowstorm, which exceeded the historical extreme value, occurred, causing large financial losses in Baicheng County, the northern edge of the Tarim Basin, Xinjiang, China. The hourly European Center for Medium-Range Weather Forecasts fifth-generation (ERA5) high-resolution reanalysis data (0.25°×0.25°), meteorological observation data, and FY−2G satellite data were used to fully analyze the atmospheric circulation anomalies, multi-scale atmospheric circulation characteristics, and physical mechanisms. The following results were obtained: (1) The atmospheric circulation of the snowstorm was typical of a South Xinjiang snowstorm circulation: upper-level South Asian high, subtropical trough, and subtropical westerly jet, mid-level Central Asian vortex, and low-level easterly jet and converging lines combined with the cold high pressure and converging lines at the surface. (2) Extreme snowstorm was caused by the interplay of different-scale atmospheric circulation anomalies. The upper-level anomalies of Iran subtropical high and anomalous easterly airflow at low latitudes led to the anomalous combination of the Central Asian vortex and the plateau vortex at 500 hPa and also generated anomalous easterly airflow at 700 hPa, guiding warm and humid air from the South China Sea and the Bay of Bengal along the Hexi Corridor to the central Tarim Basin, causing water vapor convergence and enhancing vertical upward movement, with the triggering of the surface convergence line, resulting in an extreme snowstorm. A stable maintenance of surface high-pressure systems and cold front produce continuous cooling in the Tarim Basin. Moreover, Baicheng County is located in a shallow mountainous area with an altitude above 1000 m, and the combination produced extreme snowstorm in April. (3) For Baicheng County, the key roles are the upward motion in the middle layer of the troposphere and the vertical wind shear at 300−500 hPa. The vertical profile shows that the level of upward motion of the snowstorm is located at 500–700 hPa, showing mesoscale symmetric instability characteristics. Using the frontogenetic function equation and the moist potential vorticity equation, we found that the intensity of the vertical potential temperature gradient and westerly wind anomalies lead to the development of baroclinic instability, causing surface frontogenesis, generating 300 hPa and surface moist potential vorticity anomalies, affecting the development of snowstorm through upward motion changes. (4) The consistency of the moving and propagation directions determines the evolutionary characteristics of mesoscale clouds production and extinction. In turn, the continuous development of mesoscale clouds moving northeastward through Baicheng County increases the duration and intensity of the snowstorm. The above findings can deepen the knowledge of extreme snowstorms in the Tarim Basin and provide scientific support for accurate forecasting and precise services.

Key words: extreme snowstorm; atmospheric circulation anomalies; moist potential vorticity; mesoscale clouds; Tarim Basin